干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.12

# 西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析①

潘美慧[1]， 薛雯轩[1]， 伍永秋[2]， 黄文敏[3]， 马建军[1]， 杨安娜[1]， 陈玉林[1]

（1 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070； 2 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心，北京 100875； 3 北京师范大学第二附属中学未来科技城学校，北京 102209）

**摘 要：**通过对西藏定结地区典型爬坡沙丘表层沉积物的形态参数、粒度组成和粒度参数等进行分析，揭示其粒度特征。结果表明：(1)爬坡沙丘表层沉积物以细砂和中砂为主，极细砂含量较少，同时含有少量粉砂和粗砂，不含粘土成分。(2)沙丘平均粒径范围1.98～2.41 Φ，分选系数变化范围为0.45～0.75，属中等分选，偏度变化范围为0.01～0.12，呈近对称至正偏分布，峰度变化范围为0.94～1.01，呈中等尖锐峰态。(3)从样品PPSQ1～PPSQ6，随着高度和距离的增加，沙丘表层沉积物平均粒径先变细后变粗，分选不断变好。(4)爬坡沙丘表层沉积物主要来源于河漫滩。(5)与雅鲁藏布江、东昆仑山地区爬坡沙丘对比可知，定结地区的沙丘粒径较粗，分选较好，主要是物源及风力分选作用的共同结果。

**关 键 词：** 爬坡沙丘；粒度特征；定结地区

粒度分析方法在沉积物的研究中运用较多，同时也是研究第四纪环境演变的常用方法之一[1-2]。沙丘的粒度特征可以反映风沙动力过程，对判定沉积环境、控制沙丘地貌具有重要意义[3-5]。沉积物粒度特征通常从形态参数、粒度组成和粒度参数等方面进行分析，其中粒度参数主要包括平均粒径(*Mz*)、分选系数($\sigma$)、偏度(*SK*)、峰度(*KG*)等。此外，频率分布曲线等指标也被应用于粒度分析[6-12]。

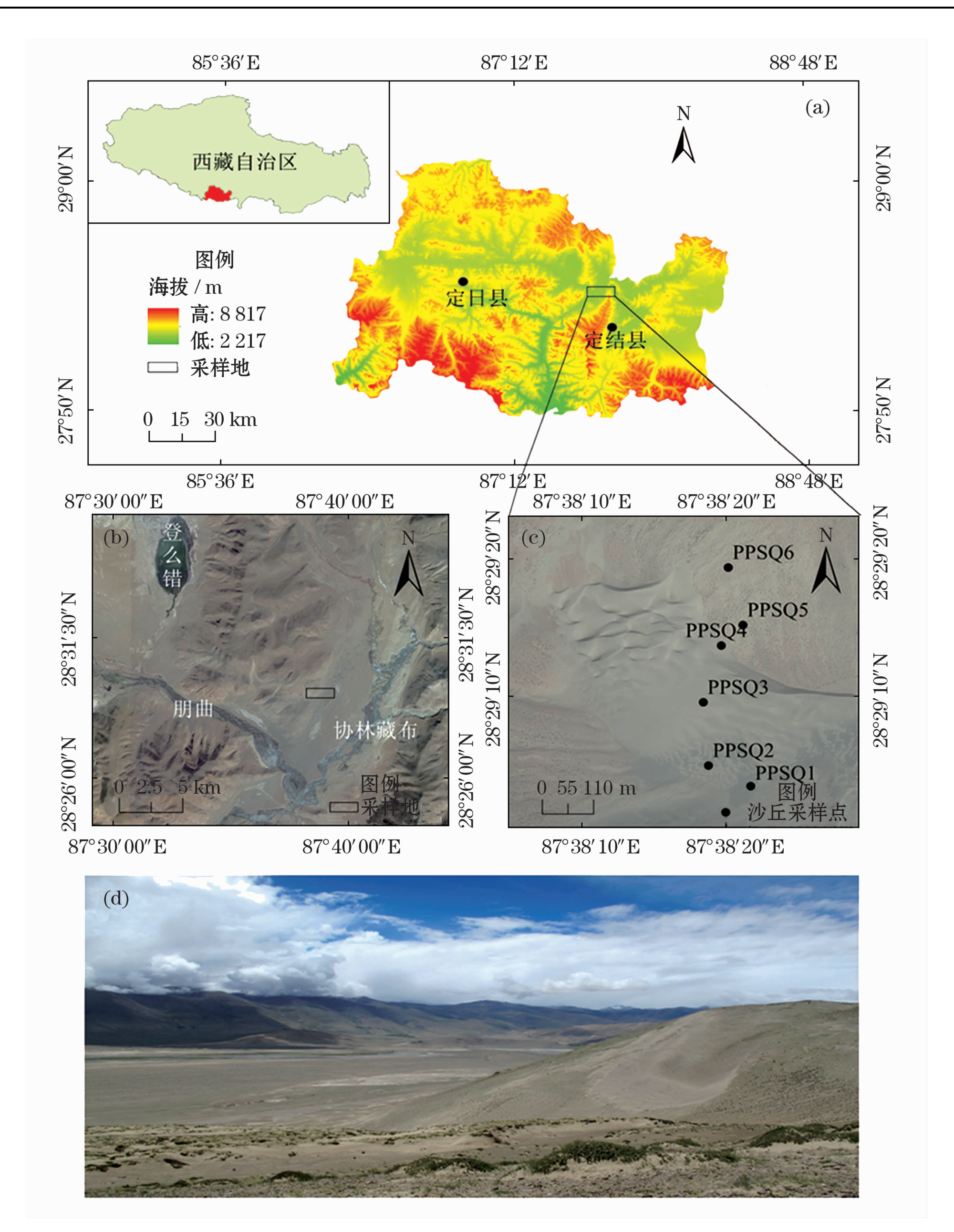
青藏高原风沙地貌分布广泛[13-16]，发育有各种不同类型的沙丘。爬坡沙丘是青藏高原典型的沙丘类型之一。爬坡沙丘指沙丘在移动过程中受山体阻挡，在风力作用下沙粒物质沿山坡爬升形成的沙丘[17]。该沙丘属于地形障碍沙丘，通常分布在干旱内陆区和海岸地带[18]。国内外学者对爬坡沙丘的研究始于20世纪40年代。国外研究区域主要集中在美国加利福尼亚的莫哈韦沙漠[19]、南非贝蒂海湾[20]、夏威夷Ka'u沙漠[21]等地区，我国研究主要集中在雅鲁藏布江流域[22-23]、东昆仑山区[24-25]以及海南岛西海岸[26]，且对海岸地带的研究较多，干旱区研究较少。青藏高原地处干旱与半干旱区，是我国典型的地貌系统，对该地区爬坡沙丘的研究尤为重要。以往对青藏高原爬坡沙丘的研究主要集中在雅鲁藏布江流域、东昆仑山地区，而其他地区的研究较少。

本文以青藏高原南部的西藏定结地区爬坡沙丘为研究对象。该地区地处高原边缘地区，是高原气候变化的敏感区。通过对该地区典型爬坡沙丘表层沉积物的粒度组成和参数进行分析，查明定结地区爬坡沙丘的粒度特征，为揭示爬坡沙丘形成过程提供理论基础，同时为区域荒漠化治理、高原沙漠化和环境保护研究提供借鉴。

## 1 研究区概况

本研究区位于喜马拉雅山北麓定结地区(27°48′～29°10′N，86°20′～88°21′E；图1)。该地区气候为高原温带半干旱气候，年平均气温2 ℃，1月平均气温-8 ℃，7月平均气温12 ℃。年降雨量236 mm，且70%以上集中在7～8月上旬。蒸发旺盛，年蒸发量约3 000 mm，是年降雨量的10多

① 收稿日期：2019-04-11； 修订日期：2019-07-19
基金项目：国家自然科学基金项目(41807448)
作者简介：潘美慧(1983-)，女，博士，副教授，主要从事风沙地貌与环境演变、第四纪地质学等方面的研究
E-mail：panmh@nwnu.edu.cn




注:(a) 研究区概况图,(b) 采样区与河流空间位置关系,(c) 采样点位置图,(d) 现场采样图

图 1　研究区及采样点位置图

Fig. 1　Study area and location of the sampling sites

倍,年内干湿季分明。研究区受西风带影响,风力强劲,全年大风天气多达 230 d,风力一般可达 4 ~ 5 级,最大 10 ~ 11 级。地貌以中切割高山山地为主,间有河滩和湖盆宽谷小平原[27]。区内最高海拔 6 829 m,最低海拔 2 042 m,最大相对高差可达 4 787 m。土壤以寒钙土和寒冻土为主,还有少量潮土、冻薄层土和普通潜育土[28]。区内多裸露基岩,山前带岩石以板岩、石英岩、砂岩和页岩为主,岩石风化剥蚀作用强烈,风化作用以物理崩解作用为主。区内主要植被类型包括灌丛、草地、高山植被和耐旱作物,植被覆盖率较低。

采样区位于以朋曲和协林藏布江为主线的河谷区,海拔范围在 4 382 ~ 4 570 m,属高海拔山地[29]。该地区地貌主要受风力和流水作用的影响,风向以南南西方向为主。气候寒冷干燥,采样区内分布有少量的灌丛植被。

## 2　样品采集与研究方法

### 2.1　样品采集

在研究区内共选择 6 个爬坡沙丘(均为典型的新月形沙丘)。从山坡底部向上,编号依次为

PPSQ1、PPSQ2、PPSQ3、PPSQ4、PPSQ5、PPSQ6。各沙丘的形态参数及取样信息如表 1 所示,在迎风坡底部、迎风坡中部、迎风坡上部、丘顶和背风坡中部 5 个部位,按照 5 m 等间距取样,采集沙丘表层沉积物样品。沙丘走向均与风向(南南西)走向一致。此外,还采集了河漫滩沉积物样品 3 个。共采集样品 44 个。

### 2.2 研究方法

沙丘样品的粒度前处理和测量工作在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室分析完成。实验采用英国 Malvern 公司 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度分析,粒度分级依据吴正《风沙地貌学》标准进行划分[30]。频率分布曲线数据主要利用软件 Mastersizer 2000 分析得出。粒度参数分析采用的是目前广泛应用的 Folk 和 Ward 的公式和标准[8,31],计算出各样品的平均粒径(*Mz*)、分选系数($\sigma$)、偏度(*SK*)和峰度(*KG*)。

## 3 结果与分析

### 3.1 粒度组成

粒度组成可以反映沙丘表层沉积物的主要组分和不同粒径组分的相对含量[8]。研究区河漫滩与爬坡沙丘的粒度组成分析结果如表 2 所示。

由表 2 可知,西藏定结地区爬坡沙丘表层沉积物以细砂和中砂为主,两者平均含量合计 87.98%;极细砂平均含量为 9.98%,含量较少;粉砂和粗砂含量极少,平均含量之和不超过 3.00%;不含粘土成分。河漫滩沉积物与爬坡沙丘表层沉积物的主要组分相同,皆以细砂和中砂为主。但爬坡沙丘表层沉积物中细砂含量高于河漫滩沉积物,中砂、粗砂含量减少,其分异原因主要受风力分选作用的影响。

**表 1 爬坡沙丘形态参数及取样信息**

**Tab. 1 Morphology parameters and sampling information on the climbing dune**

| 测量参数 | | PPSQ1 | PPSQ2 | PPSQ3 | PPSQ4 | PPSQ5 | PPSQ6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 海拔 / m | 4 382 | 4 424 | 4 471 | 4 510 | 4 528 | 4 570 |
| | 迎风坡长度 / m | 15 | 40 | 26 | 30 | 15.5 | 15 |
| | 迎风坡坡度 / ° | 31 | 26 | 22 | 27 | 15 | 25 |
| | 背风坡长度 / m | 7.2 | 6.5 | 2.1 | 2.5 | 1.5 | 0.9 |
| | 背风坡坡度 / ° | 31 | 32 | 31.5 | 31.5 | 30 | 31 |
| | 沙丘宽度 / m | / | 56 | 20 | 31 | 16.5 | 13 |
| | 沙丘移动方向 / ° | 121 | 60 | 110 | 112 | 113 | 70 |
| | 样品 / 个 | 5 | 11 | 7 | 8 | 5 | 5 |
| 样品编号 | 背风坡中部 | 1-1 | 2-1 | 3-1 | 4-1 | 5-1 | 6-1 |
| | 丘顶 | 1-2 | 2-2 | 3-2 | 4-2 | 5-2 | 6-2 |
| | 迎风坡上部 | 1-3 | 2-3、2-4、2-5 | 3-3、3-4 | 4-3、4-4 | 5-3 | 6-3 |
| | 迎风坡中部 | 1-4 | 2-6、2-7、2-8 | 3-5 | 4-5、4-6 | 5-4 | 6-4 |
| | 迎风坡底部 | 1-5 | 2-9、2-10、2-11 | 3-6、3-7 | 4-7、4-8 | 5-5 | 6-5 |

**表 2 河漫滩与爬坡沙丘粒度组成统计**

**Tab. 2 Grain size distribution of floodpain and the climbing dune**

| 沙丘序号 | | 粒度分级 / % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 粘土 <0.004 mm | 粉砂 0.004~0.063 mm | 极细砂 0.063~0.125 mm | 细砂 0.125~0.25 mm | 中砂 0.25~0.5 mm | 粗砂 >0.5 mm |
| 河漫滩 | 平均值 | 0.00 | 0.00 | 4.12 | 47.19 | 41.68 | 7.01 |
| 爬坡沙丘 | PPSQ1 | 0.00 | 1.51 | 9.82 | 35.67 | 44.42 | 8.59 |
| | PPSQ2 | 0.00 | 0.76 | 13.62 | 51.92 | 32.96 | 0.74 |
| | PPSQ3 | 0.00 | 0.01 | 14.74 | 62.97 | 22.28 | 0.00 |
| | PPSQ4 | 0.00 | 0.18 | 12.09 | 62.73 | 24.99 | 0.01 |
| | PPSQ5 | 0.00 | 0.00 | 5.37 | 54.43 | 39.75 | 0.45 |
| | PPSQ6 | 0.00 | 0.00 | 4.22 | 63.77 | 32.00 | 0.01 |
| | 平均值 | 0.00 | 0.41 | 9.98 | 55.25 | 32.73 | 1.63 |

由爬坡沙丘不同部位沉积物的粒度组成可知，从迎风坡坡底至坡顶，极细砂和细砂组分逐渐减少，中砂和粗砂逐渐增加，丘顶部位中砂和粗砂含量最大，背风坡粒度较丘顶明显变细；各部位沉积物优势粒级均为细砂和中砂，从迎风坡底部至背风坡中部，二者含量之和分别为 81.46%、84.93%、84.84%、85.97% 和 87.43%（图 2）。

其中，爬坡沙丘顶部表层沉积物的优势粒级均为细砂和中砂，粉砂、极细砂、粗砂含量较少（图 3）。从图中变化趋势可以看出，从 PPSQ1 至 PPSQ4，沙丘表层沉积物中细砂含量不断增加，中砂含量逐渐减少。在 PPSQ5 处发生明显变化：该沙丘顶部的表层沉积物中细砂含量降低，中砂含量增加，且中砂含量超过细砂含量。

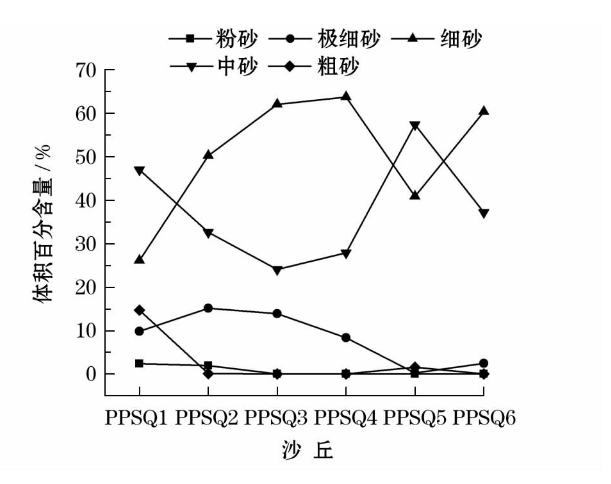



图 3　爬坡沙丘顶部粒度组成变化

Fig. 3　Variation in grain size distribution at the top of the climbing dune

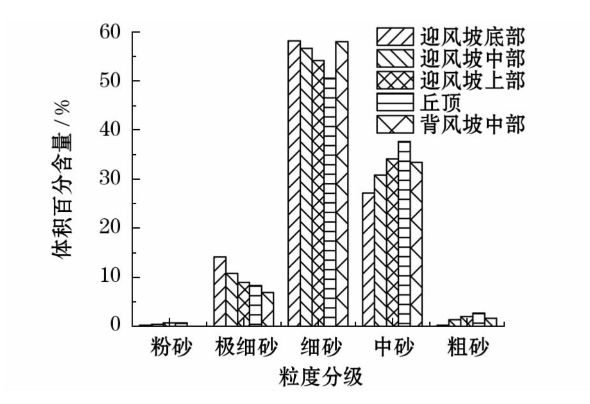



图 2　爬坡沙丘不同部位粒度组成变化

Fig. 2　Variation in grain size distribution at different positions of the climbing dune

粒度频率分布曲线是常用的粒度特征图形表达方法之一[8]。根据 6 个爬坡沙丘不同部位表层沉积物的粒度分析数据，在沙丘的迎风坡、丘顶和背风坡分别选取代表性样品，绘制沙丘不同部位的频率分布曲线（图 4）。从图中可以看出，研究区爬坡沙丘表层沉积物呈近似对称的单峰分布，峰值位于 1 ~4 Φ之间。

## 3.2　粒度参数

根据沙丘粒度分析数据，计算河漫滩及爬坡沙丘表层沉积物粒度参数，如表3所示。定结地区河

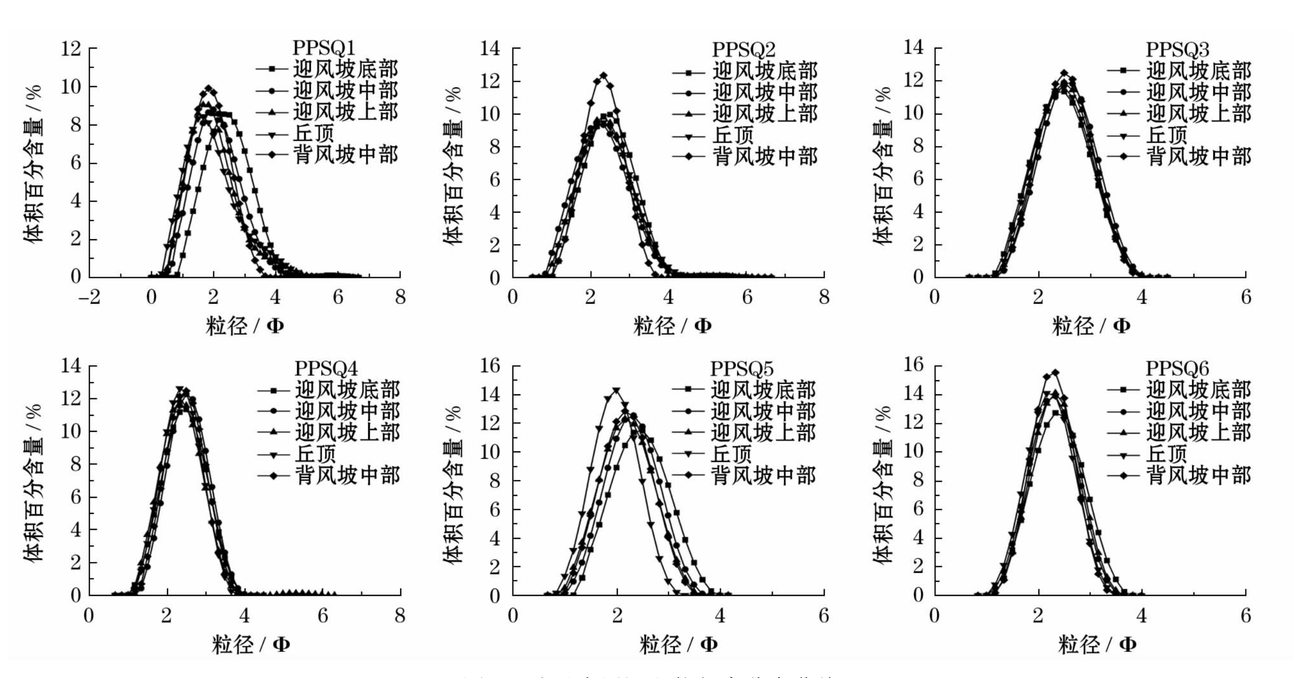



图 4　沙丘表层沉积物频率分布曲线

Fig. 4　Grain size frequency distribution curves of the sand dune surface sediment

漫滩沉积物平均值为 1.98 Φ;分选系数平均值为 0.70;偏度平均值为 -0.06;峰度平均值为 1.07。爬坡沙丘平均粒径范围 1.98 ~ 2.41 Φ,平均值 2.23 Φ;分选系数范围在 0.45 ~ 0.75,平均值为 0.57,分选较好;偏度值变化范围为 0.01 ~ 0.12,平均值为 0.04;峰度变化范围为 0.94 ~ 1.01,平均值为 0.97。通过对比可知,从河漫滩到爬坡沙丘沉积物平均粒径变细,分选变好,主要是受风力分选作用的影响。

从 PPSQ1 到 PPSQ6,随着高度和距离的增大,沙丘平均粒径先变细后变粗;沙丘分选系数不断减小,分选不断变好;偏度为近对称至正偏向分布,峰态为中等尖锐峰态(表 3)。

计算了爬坡沙丘迎风坡底部、迎风坡中部、迎风坡上部、丘顶和背风坡中部 5 个部位的总体粒度参数平均值,绘制爬坡沙丘不同部位总体粒度参数变化图(图 5)。其变化特征表现为:由两坡(迎风坡和背风坡)至丘顶平均粒径总体上变粗,分选性变差,偏度从近对称至正偏分布,峰态为中等尖锐。

表 3 河漫滩与爬坡沙丘粒度参数

Tab. 3 Grain size parameters of floodplain and the climbing dune

| 样品名称 | | *Mz* / Φ | *σ* | *SK* | *KG* |
|---|---|---|---|---|---|
| 河漫滩 | 平均值 | 1.98 | 0.70 | -0.06 | 1.07 |
| 爬坡沙丘 | PPSQ1 | 1.98 | 0.75 | 0.12 | 1.01 |
| | PPSQ2 | 2.28 | 0.64 | 0.05 | 0.95 |
| | PPSQ3 | 2.41 | 0.53 | 0.01 | 0.94 |
| | PPSQ4 | 2.35 | 0.52 | 0.02 | 1.01 |
| | PPSQ5 | 2.13 | 0.5 | 0.01 | 0.95 |
| | PPSQ6 | 2.21 | 0.45 | 0.01 | 0.95 |
| | 平均值 | 2.23 | 0.57 | 0.04 | 0.97 |

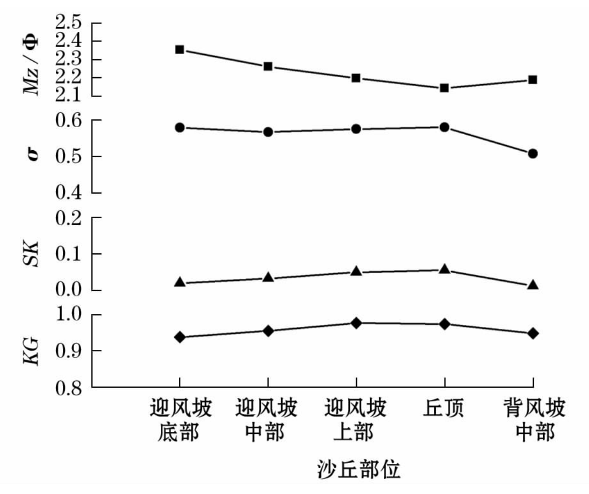



图 5 爬坡沙丘不同部位粒度参数变化

Fig. 5 Variation in grain size parameters at different positions in the climbing dune

由图 5 可知,沙丘顶部表层沉积物的粒度特征较为明显。具体分析各个沙丘顶部沉积物粒度特征可知,从山坡底部向上,爬坡沙丘顶部表层沉积物平均粒径大体呈变细趋势,分选不断变好,偏态趋于近对称,峰态由尖锐向中等尖锐过度(图 6)。PPSQ5 处较为特殊,该沙丘顶部表层沉积物相对于周边沙丘平均粒径较粗。

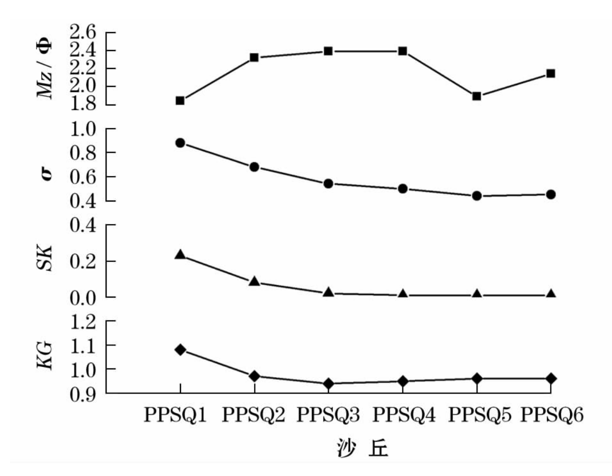



图 6 爬坡沙丘顶部粒度参数变化

Fig. 6 Variation in grain size parameters at the top of the climbing dune

## 4 讨 论

### 4.1 爬坡沙丘表层沉积物物质来源

关于爬坡沙丘表层沉积物的来源一直是研究的重点。爬坡沙丘表层沉积物物源多为古沙翻新与就地起沙,沙丘下伏的砂岩、砂砾岩等碎屑岩,经过长期的风化过程后形成具有多源性的沙源;也有部分沙丘物质来源于流水、湖相沉积物,受风水交互作用的影响[18,23-25]。定结地区爬坡沙丘表层沉积物与河漫滩沉积物粒度特征存在一定的继承性和差异性(表 2,表 3)。由此可以推断,定结地区爬坡沙丘表层沉积物应源于河漫滩。在风力作用下沉积物沿山坡爬升,不断被分选,粒径逐渐变细。该地区爬坡沙丘的形成受风水交互作用的影响,这与我国雅鲁藏布江流域米林宽谷段、美国加利福尼亚的莫哈韦沙漠中爬坡沙丘形成过程相似[23,32]。

### 4.2 爬坡沙丘粒度特征空间分异原因

定结地区爬坡沙丘随着高度不断增加,沙丘表层沉积物的粒度特征呈明显变化规律:平均粒径大

体呈先变细后变粗的变化趋势,分选不断变好(图5)。沙丘平均粒径的变化除受风力分选作用影响以外,也受沙丘坡长及坡度的影响(表1)。PPSQ2~PPSQ4的迎风坡较长,沉积物受风力搬运影响时间长,较细颗粒在此沉积较多,因此沙丘沉积物较细。PPSQ5与PPSQ6的迎风坡较短,特别是PPSQ5沙丘的坡度较小,风力作用影响较小,粒径较粗。爬坡沙丘表层沉积物的分选变化规律主要受风力分选作用的影响。

PPSQ1与其他沙丘粒度组分略有区别。PPSQ1中砂含量大于细砂,其他沙丘中砂含量均小于细砂(表2)。原因在于PPSQ1位于山坡最底部,更接近沙源,较粗的颗粒物质未搬运至较远处,因而集聚至此。随着山坡高度的增加,沙丘粒度组成在空间上表现为沿山坡向上平均粒径变细,细颗粒不断被分选和爬升,因此从PPSQ1往上较细沙粒逐渐增加,较粗沙粒逐渐减少,细砂含量超过中砂。

爬坡沙丘不同部位的粒度特征也表现出明显的分异规律:由两坡(迎风坡和背风坡)至丘顶平均粒径总体上变粗,分选性变差,偏度从近对称至正偏分布,峰态为中等尖锐(图6)。这是由于:(1)在风力较强的环境下,沙粒沿风向被搬运至丘顶时,风剪切力减小,较粗的沙粒在此沉积,较细的沙粒则越过丘顶,在背风坡沉积。(2)在风力较弱的环境下,由迎风坡底部向上风力侵蚀作用不断加强,细颗粒物质被搬运带走,留下较粗颗粒组分堆积在丘顶,而被搬运来的细颗粒物质则在背风坡一侧沉积下来[33-35]。因此,爬坡沙丘粒度特征分异是风力搬运、沉积及风力分选作用的结果。

PPSQ5沙丘顶部表层沉积物的粒度特征与其他沙丘不同(图3,图6),该沙丘顶部表层沉积物平均粒径相对较粗,细砂含量较低,中砂含量较高,且中砂含量超过细砂含量。究其原因可能受沙丘形态参数的影响:该沙丘坡度较小(表1),顶部受风力侵蚀影响较小,较粗沙粒在此沉积。

通过分析定结地区爬坡沙丘粒度特征分异规律可知,仅依据沙丘形态参数、风力等因素较难彻底的说明其分异原因。爬坡沙丘形成的动力机制较为复杂,模拟实验存在一定难度。我国风沙地貌研究主要集中在塔克拉玛干沙漠等大型沙漠区[9-11],对于爬坡沙丘这种局部地区分布的沙丘研究较少。该类沙丘的形成演化也是我国沙漠化的表现形式之一。在今后的研究中,需加强对爬坡沙丘的实地观测,提高实验模拟技术,综合各因素分析爬坡沙丘的形成演化机制,为科学认识爬坡沙丘形成演化机制、沙漠化防治提供借鉴。

### 4.3 青藏高原爬坡沙丘粒度特征对比分析

爬坡沙丘是青藏高原风沙活动的重要表现形式[13,36-38]。青藏高原爬坡沙丘在不同地区有不同程度的发展。雅鲁藏布江米林宽谷段爬坡沙丘主要以细砂和极细砂为主,沙丘平均粒径较细,分选较好,偏态为近对称至正偏分布,峰态为中等尖锐[23]。位于青藏高原北部的托拉海河爬坡沙丘主要组分为细砂和极细砂,平均粒径较细,属中等分选,偏态为近对称至正偏分布,峰态为中等尖锐[24-25]。通过对比可知(表4),定结地区爬坡沙丘沉积物粒径最粗,分选最好。雅鲁藏布江米林宽谷段爬坡沙丘沉积物平均粒径最细,托拉海河爬坡沙丘沉积物分选最差。3个地区爬坡沙丘沉积物的偏态与峰态相同,均为近对称至正偏分布,中等尖锐峰态。

沙丘物源和动力条件是影响爬坡沙丘表层沉积物粒度特征的重要因素[18]。托拉海河发源于昆仑山脉,该地区爬坡沙丘物源主要为古沙翻新与就地起沙,沉积物受风力分选作用影响较小,因而分选最差。雅鲁藏布江米林宽谷段爬坡沙丘与定结地区爬坡沙丘沉积物的物源相同,都以河漫滩为沙源供给,沉积物在风力作用下不断向山坡方向前移扩展。但定结地区爬坡沙丘表层沉积物平均粒径粗于雅鲁藏

**表4 青藏高原不同地区爬坡沙丘粒度参数**

**Tab.4 Grain size parameters of the climbing dune in different regions of the Qinghai-Tibet Plateau**

| 采样地 | *Mz* / Φ | | σ | | SK | | KG | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 |
| 定结地区 | 1.98~2.41 | 2.23 | 0.45~0.75 | 0.57 | 0.01~0.12 | 0.04 | 0.94~1.01 | 0.97 |
| 托拉海河 | 2.41~3.12 | 2.74 | 0.85~1.73 | 1.00 | -0.02~0.11 | 0.05 | 0.96~1.18 | 1.08 |
| 雅鲁藏布江米林宽谷段 | 2.07~3.71 | 3.11 | 0.20~1.41 | 0.65 | -0.01~0.12 | 0.03 | 0.94~1.01 | 0.96 |

布江米林宽谷段沙丘,这种差异可能与定结地区爬坡沙丘更接近物源区、风力分选作用较强有关。

## 5 结 论

西藏定结地区爬坡沙丘表层沉积物主要来源于河漫滩,爬坡沙丘形成环境受风水交互作用的影响。

(1) 沙丘沉积物优势粒级为细砂与中砂,平均含量分别占55.25%、32.73%,极细砂含量较少,仅占9.98%,同时含有少量粉砂和粗砂,不含粘土成分,粒度频率分布曲线呈近似对称的单峰分布。

(2) 爬坡沙丘表层沉积物平均粒径范围在1.98~2.41 Φ,平均值为2.23 Φ;分选系数范围在0.45~0.75,平均值为0.57,分选较好;沙丘偏度变化范围为0.01~0.12,平均值为0.04,呈近对称至正偏分布;峰度变化范围为0.94~1.01,平均值为0.97,呈中等尖锐峰态。

(3) 各爬坡沙丘之间、沙丘不同部位之间的粒度特征具有明显的空间分异规律。随着高度和距离的增大,沙丘表层沉积物平均粒径呈先变细后变粗的变化趋势,分选不断变好,而偏度和峰度变化不大;由两坡(迎风坡和背风坡)至丘顶,沉积物平均粒径不断变粗,分选性变差。粒度空间分异特征是物源及风力分选作用的共同结果。

与青藏高原其他地区的爬坡沙丘相比,定结地区爬坡沙丘粒径最粗,分选最好,表明定结地区爬坡沙丘更接近物源区,同时风力分选作用较强。

### 参考文献(References)


[1] 吕志强,鲁瑞洁,刘小槺,等. 青海湖湖东沙地沉积记录的全新世以来风沙活动变化[J]. 干旱区地理,2018,41(3):536-544. [LYU Zhiqiang, LU Ruijie, LIU Xiaokang, et al. Holocene aeolian activities on sedimentary record at the east of Qinghai Lake[J]. Arid Land Geography,2018,41(3):536-544.]

[2] 凌智永,周亚辉,李廷伟,等. 东昆仑库木库里沙漠表层沉积物粒度特征、物源与沉积环境[J]. 干旱区地理,2017,40(5):1013-1019. [LING Zhiyong, ZHOU Yahui, LI Yanwei, et al. Grain size characteristics, provenance discrimination and sedimentary environment of the surface sediments from Kumkol Desert of eastern Kunlun Mountain[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5):1013-1019.]

[3] 李小妹,严平,吴伟,等. 毛布拉格孔兑地表风沙沉积物粒度与地球化学元素分布特征[J]. 干旱区地理,2016,39(3):468-476. [LI Xiaomei, YAN Ping, WU Wei, et al. Spatial distribution characteristics of the grain size and geochemical elements of surface sediments of Mu Bulag River[J]. Arid Land Geography,2016,39(3):468-476.]

[4] 黄文敏,伍永秋,潘美慧,等. 西藏安多剖面沉积物粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠,2014,34(2):349-357. [HUANG Wenmin, WU Yongqiu, PAN Meihui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of the Amdo profile in Tibet[J]. Journal of Desert Research,2014,34(2):349-357.]

[5] VISHER G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal Sediment Petrology,1969,39(3):1074-1106.

[6] 唐进年,丁峰,张进虎,等. 库姆塔格沙漠东南缘BL剖面粒度记录的全新世快速气候事件[J]. 干旱区地理,2017,40(6):1171-1178. [TANG Jinnian, DING Feng, ZHANG Jinhu, et al. BL section recording process of rapid climate change event of Holocene at southeastern edge of the Kumtagh Desert[J]. Arid Land Geography,2017,40(6):1171-1178.]

[7] ELISABETH D, GREGORI L, KAI H, et al. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Quaternary Research, 2015, 83(1):259-260.

[8] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1976:90-100. [Northern Shaanxi Team, Chengdu Institute of Geology. Particle size analysis and application of sedimentary rock[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976:90-100.]

[9] 宋洁,春喜,白雪梅,等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. 中国沙漠,2016,36(3):597-603. [SONG Jie, CHUN Xi, BAI Xuemei, et al. Review of grain size analysis in China desert[J]. Journal of Desert Research,2016,36(3):597-603.]

[10] 朱震达,吴正,刘恕,等. 中国沙漠概论(修订版)[M]. 北京:科学出版社,1980. [ZHU Zhenda, WU Zheng, LIU Shu, et al. Introduction to the China desert (Revised Edition)[M]. Beijing: Science Press,1980.]

[11] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003. [WU Zheng. Geomorphology of wind-drift sands and their controlled engineering[M]. Beijing: Science Press,2003.]

[12] 范天来,范育新. 频率分布曲线和概率累积曲线在沉积物粒度数据分析中应用的对比[J]. 甘肃地质,2010,(2):32-37. [FAN Tianlai, FAN Yuxin. A comparison of grain size expression methods: A case study[J]. Gansu Geology,2010,(2):32-37.]

[13] DONG Zhibao, HU Guangyin, QIAN Guangqiang, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau[J]. Reviews of Geophysics,2017,55(4):1-38.

[14] 安庆,安萍,徐汝汝,等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2017,(4):1-11. [AN Qing, AN Ping, XU Ruru, et al. Comparative study on grain size characteristics of sediments in different regions of the Tibetan Plateau and the applicability of sedimentary environment discriminant formulas[J]. Journal of Liaocheng University,2017,(4):1-11.]

[15] 钟诚,何宗宜,刘淑珍. 西藏生态环境稳定性评价研究[J]. 地理科学,2005,25(5):573-578. [ZHONG Cheng, HE Zongyi, LIU Shuzhen. Evaluation of eco-environmental stability in Tibet, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5):573-

578.]

[16] 张佩民,张振德,李晓琴,等.青藏高原荒漠化遥感信息提取及演变分析[J].干旱区地理,2006,29(5):710-717.[ZHANG Peimin,ZHANG Zhende,LI Xiaoqin,et al. Desertification remote sensing information extraction from Qinhai-Taibet Plateau and evolution analysis[J]. Arid Land Geography,2006,29(5):710-717.]

[17] 全国科学技术名词审定委员会编.地理学名词[M].北京:科学出版社,2007:96.[China National Committee for Terms in Sciences and Technologies. Geographical Noun[M]. Beijing:Science Press,2007:96.]

[18] 孟小楠,严平,董苗.爬坡沙丘的研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,(3):391-396.[MENG Xiaonan,YAN Ping,DONG Miao. Climing dunes:A review[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition),2018,(3):391-396.]

[19] BATEMAN M D,BRYANT R G,FOSTER D L,et al. On the formation of sand ramps:A case study from the Mojave Desert[J]. Geomorphology,2012,161(1):93-109.

[20] BLIGHT G B,BLIGHT G F. South Africa's mountain climbing sand dunes mechanism of formation and present status[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering,2013,(8):11.

[21] TIRSCH D,CRADDOCK R A,PLATZ T,et al. Spectral and petrologic analyses of Basaltic sands in Ka'u Desert:Implications for the dark dunes on Mars[J]. Earth Surface Processes & Landforms,2012,37(4):434-448.

[22] 李森,王跃.雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题[J].中国沙漠,1997,17(4):342-350.[LI Sen,WANG Yue. Classification and development of aeolian sand landform in the Yarlung Zangbo Vally[J]. Journal of Desert Research,1997,17(4):342-350.]

[23] 周娜,张春来,刘永刚.雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究[J].地理研究,2012,31(1):82-94.[ZHOU Na,ZHANG Chunlai,LIU Yonggang. Variation of grain sizes on a mountain climbing dune in Mainling wide valley,Yarlung Zangbo River[J]. Geographical Research,2012,31(1):82-94.]

[24] 赵子允.东昆仑山区风沙地貌的特征[J].中国沙漠,1983,3(3):35-39.[ZHAO Ziyun. Characteristics of aeolian landform in eastern Kulun Mountain[J]. Journal of Desert Research,1983,3(3):35-39.]

[25] 董苗,严平,孟小楠,等.青藏高原爬坡沙丘地表沉积物特征分析——以柴达木盆地托拉海河为例[J].水土保持学报,2018,32(4):101-108.[DONG Miao,YAN Ping,MENG Xiaonan,et al. Characteristics of surface sediments of the climbing dunes on the Qinghai-Tibetan Plateau:Taking the Tola Hai River in the Qaidam Basin as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation. 2018,32(4):101-108.]

[26] LIU Sen,LIU Xianwan,LI Huichuan,et al. A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island[J]. Journal of Geographical Sciences,2007,17(4):453-468.

[27] 叶延琼,杨忠,第宝锋,等.西藏定结县草地资源与畜牧业可持续发展[J].山地学报,2003,21(3):337-341.[YE Yanqiong,YANG Zhong,DI Baofeng,et al. On grassland resource and the sustainable development of animal husbandry in Dinggye county,Tibet[J]. Journal of Mountain Science,2003,21(3):337-341.]

[28] 潘美慧.西藏定结地区全新世风沙活动研究[D].北京:北京师范大学,2012.[PAN Meihui. Study on Holocene sand blowing activity in Dingjie area of Tibet[D]. Beijing:Beijing Normal University,2012.]

[29] 李炳元,潘保田,韩嘉福.中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J].第四纪研究,2008,28(4):535-543.[LI Bingyuan,PAN Baotian,HAN Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions[J]. Quaternary Sciences,2008,28(4):535-543.]

[30] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987.[WU Zheng. Geomorphology of wind-drift sands[M]. Beijing:Science Press,1987.]

[31] FOLK R L,WARD W C. Brazos river bar:A study in the significance of grain size parameter[J]. Journal of Sedimentary Research,1957,27(1):3-26.

[32] MUHS D,LANCASTER N,SKIPP G L. Geochemical evidence for a complex origin for the Kelso dunes,Mojave National Preserve,California USA[J].2017.

[33] 赵澄林.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2001:48-72.[ZHAO Chenglin. Sedimentary petrology[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2001:48-72.]

[34] 俞胜清,阿布都米基提,周向玲,等.新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征[J].中国沙漠,2013,33(6):1629-1635.[YU Shengqing,Abdu Mijiti,ZHOU Xiangling,et al. Grain size characterist dunes in Karakum Desert,Xinjiang,China[J]. Journal of Desert Research,2013,33(6):1629-1635.]

[35] 李恩菊,董治宝,赵景波,等.巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J].干旱区地理,2011,34(3):471-478.[LI Enju,DONG Zhibao,ZHAO Jingbo,et al. Grain size distribution of the aeolian sediments on the stoss slope of a typical mega dune in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Land Geography,2011,34(3):471-478.]

[36] XIAO Jianhua,JU Jianjun,YAO Zhengyi,et al. Morphology and formation mechanism of sand shadow dunes on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Arid Land,2015,7(1):10-26.

[37] ZHANG Kechun,JU Jianjun,LIAO Kongtai,et al. Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet railway in China[J]. Aeolian Research,2010,1(3):143-146.

[38] QIANG M R,CHEN F H,SONG L,et al. Late Quaternary aeolian activity in Gonghe Basin,northeastern Qinghai-Tibetan Plateau,China[J]. Quaternary Research,2013,79(3):403-412.

# Grain size characteristics of the climbing dunes in Dinggye area of Tibet

PAN Mei-hui[1], XUE Wen-xuan[1], WU Yong-qiu[2], HUANG Wen-min[3], MA Jian-jun[1], YANG An-na[1], CHEN Yu-lin[1]

(1 *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;

2 *Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;

3 *The Second Affiliated Middle School Future Science City School of Beijing Normal University, Beijing* 102209, *China*)

**Abstract:** The climbing dunes are widely distributed in Dinggye area of Zigaze Prefecture, Tibet, China, and the surface sediment grain size characteristics are of great significance for exploring the development process of sand dunes. In this paper, six climbing dunes sand were collected in the area. In order to reveal the grain size characteristics, the study analyzed the morphological parameters, mechanical composition and grain size parameters of surface sediments of the dunes, which provide a theoretical basis to reveal the climbing dune's formation mechanism on the Qinghai-Tibet Plateau. The current researches were mainly concentrated on the climbing dunes in coastal areas rather than that in arid areas. Studying the climbing dunes on the Qinghai-Tibet Plateau can explore the grain size characteristics of climbing dunes in inland arid regions. The results are summarized as follows: The surface sediments of climbing dunes are mainly composed of silver sand and medium sand, accounting for 55.25% and 32.73% respectively. Fine sand accounts for 9.98%. The content of silty and coarse sand are less than 3%. The frequency curves of grain size are showing an approximate symmetrical unimodal distribution, and sand dunes have a slender tail on one side of the fine particles. The range of *Mz* is 1.98 – 2.41 Φ and the mean value is 2.23 Φ. The range of $\sigma$ is 0.45 – 0.75 and the mean value is 0.57, which is good for middling sorting. The range of *SK* is 0.01 – 0.12, the mean value is 0.04, and kurtosis is positive. The range of *KG* is 0.94 – 1.01, the mean value is 0.97, and kurtosis presents a single peak. As the height and distance increasing, the *Mz* of the climbing dunes trends to be thinner first and later coarser, the sorting gets better. The variation trend of grain size characteristics of different parts of sand dunes is as follows: The *Mz* from the windward and the leeward slope to the top of the leeward is generally coarser, and the sorting is worse. The variation trend of *SK* is from near symmetry to positive deviation, and the *KG* has a medium sharp. The reason for its differentiation is mainly affected by the source and wind sorting. The analysis of the sources of the sediment reveals that the dune surface sediment is mainly from the floodplain. Comparing with the climbing dunes in the Yarlung Tsangpo River and the eastern Kunlun Mountains, the surface sediments of the climbing dunes in the study area is coarser and the sorting is relatively better. It indicates that the climbing sand dunes are closer to the source area, and the wind sorting effect is stronger in Dinggye than the other two areas.

**Key words:** climbing dune; grain size characteristics; Dinggye area